МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 625.7/.8 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256

Исследование характеристик динамического отклика дорожных конструкций при ускоренном тестировании

Ни Гуанцунг[1], **А.Н. Тиратурян**[2] ✉, **Е.В. Углова**[2], **А.В. Воробьев**[2]
[1] Шаньдунский транспортный университет, г. Цзинань, провинция Шаньдун, Китайская Народная Республика
[2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ tiraturjan@list.ru

Аннотация
Введение. Одним из главных трендов в области испытаний дорожных конструкций в последние годы стали натурные исследования их крупномасштабных моделей на установках ускоренного тестирования (ALF). Это позволяет значительно уменьшить затраты на выбор наиболее экономичных и долговечных конструкций дорожных одежд. Однако результаты, полученные на установках ALF, зачастую являются относительными, так как практически не увязываются с результатами лабораторных и полевых испытаний на реальных объектах. Поэтому целью данного исследования явилось комплексное изучение отклика дорожной конструкции на динамическую нагрузку, установление закономерностей усталостного разрушения асфальтобетонных слоев при испытаниях на ускоренное тестирование и при натурных испытаниях на реальных объектах.
Материалы и методы. При проведении испытаний использовалась установка ускоренного тестирования, находящаяся в Шаньдунском транспортном университете. Полевые испытания проходили с применением установки динамического нагружения с падающим грузом FWD Primax 1500, которая осуществляет регистрацию чаши прогиба на поверхности обследуемой конструкции. Для регистрации динамического отклика в структуре дорожной конструкции использовался комплекс тензометрических датчиков, позволяющих отмечать как сжимающие напряжения, так и растягивающие деформации в различных слоях. Результаты, полученные в натурных условиях, были сопоставлены с результатами, полученными на математической МКЭ-модели.
Результаты исследования. Результаты исследования показали, что толщина верхнего слоя основания является основным фактором, влияющим на величину вертикальной деформации дорожного покрытия, который необходимо учитывать на стадии проектирования конструкции дорожной одежды. При толщине верхнего слоя основания в 10 см вертикальная деформация — 100 мкм, а при толщине в 20 см — 55 мкм при условии обеспеченности общей равнопрочности конструкции. Количество циклов приложения нагрузки на установке ускоренного нагружения имеет минимальное влияние на отобранные образцы асфальтобетона при испытаниях прочности на раскол.
Обсуждение и заключение. Путем комплексного сопоставления данных численного моделирования и натурных испытаний показана их тождественность результатам, полученным в ходе ускоренного тестирования дорожных конструкций, обоснована адекватность применяемых расчетных методик. Результаты исследования могут быть применены в дорожной отрасли для разработки и совершенствования нормативной базы при проектировании нежестких дорожных одежд в условиях повышенных нагрузок и интенсивного движения транспорта.

Ключевые слова: асфальтобетонное покрытие, установки ускоренного тестирования, многослойное полупространство, напряженно-деформированное состояние, температурная корректировка, модель динамического отклика

Благодарности: авторы статьи выражают искреннюю благодарность сотрудникам дорожно-испытательной лаборатории Шаньдунского транспортного университета за содействие в выполнении исследований на установке ускоренного тестирования (ALF), а также уважаемым рецензентам за время и силы, затраченные на рассмотрение данной статьи.

Финансирование. Исследования проводились в рамках гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (заявка МК-242.2022.4).

Для цитирования. Гуанцунг Ни, Тиратурян А.Н., Углова Е.В., Воробьев А.В. Исследование характеристик динамического отклика дорожных конструкций при ускоренном тестировании. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):241–256. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256

Original article

Study on Dynamic Response Characteristics of Different Asphalt Pavement Structures Based on ALF Test

Ni Guangcong, Artem N. Tiraturyan, Evgeniya V. Uglova, Andrey V. Vorobev

[1] ShanDong JiaoTong University, Jinan, China

[2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ tiraturjan@list.ru

Abstract

Introduction. In recent years, one of the main trends in the field of testing road structures has become field study of their large-scale models at the accelerated load facility (ALF). It can significantly reduce the cost of selecting the most economical and durable pavement designs. However, the results obtained on the ALF are often relative, since they practically do not correlate with the results of laboratory and field tests on real objects. This study is aimed at a comprehensive investigation of the response of a road structure to a dynamic load, the establishment of patterns of fatigue failure of asphalt concrete layers during the accelerated testing and full-scale tests on real objects.

Materials and Methods. During testing, an accelerated load facility was used, located on the territory of the ShanDong Transport University. When conducting field tests, a dynamic loading unit with a falling weight FWD Primax 1500 was used, which recorded the deflection bowl on the surface of the structure under study. To record the dynamic response in the arrangement of the road structure, a complex of strain gauge sensors was used, which made it possible to register both compressive stresses and tensile strains in different layers. The results obtained under natural conditions were compared to the results obtained on the mathematical FEM model.

Results. The research results have shown that the thickness of the lower coating layer is the main factor affecting the amount of vertical deformation of the pavement, which must be taken into account at the design stage of the pavement structure. Thus, with a thickness of the upper layer of the base of 10 cm, the vertical deformation was 100 µm, and with a thickness of 20 cm – 55 µm, provided that the overall strength of the structure was ensured. The number of load application cycles on the ALF had a minimal effect on the selected asphalt concrete samples during split tensile tests.

Discussion and Conclusion. The adequacy of the results obtained in the course of accelerated testing of road structures was shown through a comprehensive comparison of numerical simulation data and full-scale tests, and the adequacy of the applied calculation methods was validated. The results of the study can be further applied in the road industry to develop and improve the regulatory framework for the design of non-rigid pavement under conditions of increased loads and heavy traffic.

Keywords: asphalt concrete pavement, accelerated loading test, multilayered half-space, stress-strain, temperature correction, dynamic response model

Acknowledgements: the authors appreciate the staff of the Road-testing laboratory, ShanDong Transport University, for their assistance in carrying out research at the ALF installation, as well as the respected reviewers for the time and effort spent on reviewing this article.

Funding information. The research was carried out within the framework of a grant from President of the Russian Federation on State support for young Russian scientists — Candidates of science (application МК-242.2022.4).

For citation. Guangcong Ni, Tiraturyan AN, Uglova EV, Vorobev AV. Study on Dynamic Response Characteristics of Different Asphalt Pavement Structures Based on ALF Test. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2023;23(3):241–256. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256

Введение. Усталостные повреждения являются одной из основных форм повреждений эксплуатируемых асфальтобетонных покрытий [1, 2]. Как правило, они связаны со знакопеременным нагружением от интенсивного многоциклового воздействия транспортного потока. Этот вид разрушений характерен для автомобильных дорог всего мира и является одной из важнейших проблем, на решение которой направлено

внимание ученых-дорожников. Одним из приоритетных направлений современных исследований в области прогнозирования усталостного разрушения является испытание дорожных конструкций на установках ускоренного тестирования. Определенный вклад в решение этой проблемы внесли китайские ученые, проанализировавшие закон изменения модуля упругости асфальтобетонного слоя и его деформации в процессе ускоренного нагружения [3, 4]. Механизм разрушения и усталостные характеристики асфальтобетонной смеси в процессе эксплуатации исследованы в работе [5]. Ее авторами был получен поправочный коэффициент, учитывающий различие в механизмах деформирования дорожной конструкции при воздействии испытательной нагрузки на установках ускоренного тестирования и при реальных испытаниях в полевых условиях.

В целом нужно отметить, что, несмотря на достаточно эффективное моделирование проезда единичных нагрузок от транспортного потока, воспроизводимое на установках ускоренного тестирования, возникают сложности с моделированием распределения нагрузки по ширине проезжей части, условий окружающей среды, грунтово-геологических условий и прочего. Таким образом, результаты испытаний на установках ускоренного тестирования нельзя напрямую использовать для оценки усталостных характеристик фактического дорожного покрытия. Они требуют дополнительной валидации под реальные условия.

Авторы работ [6–8] изучили отклики дорожных конструкций на динамическое воздействие тестовой нагрузки, сравнили и проанализировали их изменения. Исследователями были применены методы, сочетающие визуальное наблюдение в реальном времени, инструментальные испытания на прогиб и сопротивляемость усталостным разрушениям в процессе нагружения, а также выполнены работы по установлению взаимосвязей между напряжениями, деформациями в структуре дорожной одежды и температурой различных конструкций дорожного покрытия.

Также необходимо отметить, что подобные исследования, помимо КНР, проводятся и в других странах, в том числе и в Российской Федерации, государствах Европы и США. Результаты активных исследований, направленных на сопоставление лабораторных режимов нагружения с режимами нагружения, соответствующими реальным дорожным условиям, были рассмотрены в работах [9–11]. Вместе с тем отсутствуют аналогичные сопоставления результатов полевых и лабораторных исследований с результатами, получаемыми на крупномасштабных моделях в условиях управляемого эксперимента. Результаты экспериментальных исследований в области прогнозирования усталостного разрушения асфальтобетонных слоев приводятся в работах [12–14]. В них комплексно рассмотрены вопросы определения эмпирических коэффициентов, необходимых для прогнозирования усталостного разрушения слоев асфальтобетона по данным полевых визуальных наблюдений, а также стандартные методы испытаний асфальтобетона на усталость при приложении четырехточечной нагрузки или при непрямом растяжении. Однако вопросы исследования на крупномасштабных моделях в них также не затрагиваются. Ряд работ касается непосредственно крупномасштабного моделирования, но для разных по своей конструкции дорожных одежд [15–17]. Сопоставление же равнопрочных конструкций с различными слоями и их толщинами является наиболее интересным с исследовательской точки зрения, так как оно позволит установить закономерности в процессах деформирования асфальтобетона, связанных с его усталостным разрушением.

Материалы и методы. Установка ускоренного тестирования. Установка ускоренного тестирования (ALF) находится на территории Транспортного университета г. Шаньдунь. Она представляет собой набор оборудования для комплексных испытаний дорожных конструкций (рис. 1). На текущий момент это один из методов моделирования, наиболее приближенных к реальным условиям воспроизведения движущейся транспортной нагрузки. ALF применяют для изучения характеристик асфальтобетонных покрытий при пластических деформациях, усталостном трещинообразовании и нисходящем трещинообразовании. На установках ALF можно регулировать нагрузку на ось и скорость ее движения, что обеспечивает наилучшее из всех видов испытательного оборудования соответствие реальным условиям деформирования.



Рис. 1. Установка для испытаний на ускоренную нагрузку [8]

Для изучения усталостной сопротивляемости асфальтобетонных смесей в процессе эксплуатации, дефектов дорожного покрытия в разных регионах были выбраны три типовые конструкции дорожных одежд для устройства на испытательной дороге. Тестовый участок дороги имеет длину 12 м, ширину 4 м. Конструкция дорожной одежды представляет собой рабочий слой грунта земляного полотна, укрепленного цементом, с покрытием из трех различных типов асфальтобетона: S1, S2 и S3 соответственно (рис. 2). Расчетная нагрузка, воспроизводимая системой ALF, представляет собой полуосевую нагрузку, передаваемую через два колеса — BZZ-100. Диапазон воспроизводимой нагрузки составляет 80–200 кН, шаг нагрузки — 20 кН, интервал времени между приложениями нагрузки — 9 с.

4 м	4 м	4 м
←——→	←——→	←——→
5 см SMA-13		
5 см АС-20	10 см АС-20	15 см АС-20
20 см АС-25	15 см АС-25	10 см АС-25
Грунт, обработанный цементом 6 %		
Грунт, обработанный цементом 4 %		
Земляное полотно		

Рис. 2. Конструкция дорожной одежды на участке полевых испытаний

Для обеспечения мониторинга в режиме реального времени за динамическим откликом конструкции в процессе строительства тестового участка дороги был смонтирован набор оборудования из датчиков давления грунта, деформации и температуры, установленных параллельно и перпендикулярно направлению нагружения (рис. 3, 4). В нижней части монолитного асфальтобетонного слоя расположены четыре датчика горизонтальной и продольной деформации (рис. 5). Канал сбора данных соответствующего датчика и его местоположение указаны в таблице 1. Такая схема расстановки оборудования подтверждается мировым опытом мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) дорожных конструкций и отражена в работах [18–19].



Рис. 3. Датчик для регистрации давления в грунте и на поверхности слоев основания [18]



Рис. 4. Датчик для регистрации относительной растягивающей деформации [18]

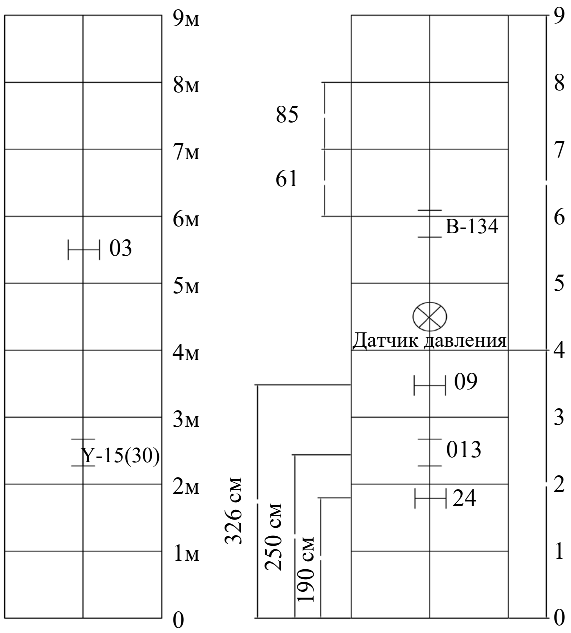


Рис. 5. Глубина заложения каждого датчика

Таблица 1

Номер датчика и его расположение

Номер	Модель	Расположение
W1	B-134	6,0 м
W2	013	2,5 м
W3	24	2,0 м
W4	09	3,2 м
W5	Y-15	2,5 м
W6	03	5,5 м
F1	Датчик давления грунта	4,5 м

Для регистрации динамического отклика на поверхности дорожной конструкции в дополнение к установке ALF использовалась установка динамического нагружения с падающим грузом FWD PRIMAX 1500. Эта установка представляет собой импульсный динамический измеритель перемещений поверхности покрытия, который позволяет определять историю перемещений на поверхности покрытия дорожной одежды при ударном воздействии посредством установленных датчиков геофонов (рис. 6). Исследования показали, что FWD можно использовать для определения модулей упругости слоев дорожных одежд во время испытания на установках ускоренного тестирования ALF [20]. В ходе исследований измерения установкой FWD проводились каждый раз по истечении 70 000 циклов на установке ALF. Схема проведения измерений показана на рис. 7.



Рис. 6. Установка ударного нагружения FWD [20]

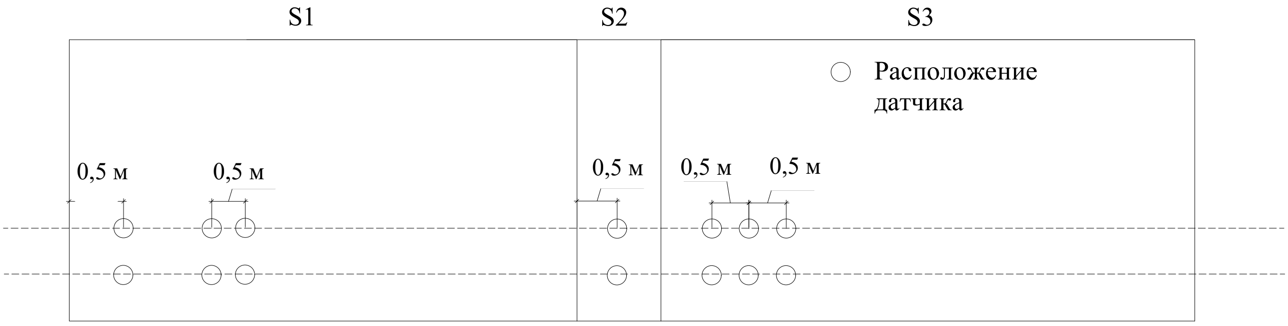


Рис. 7. Принципиальная схема проведения измерений установкой FWD

Испытания прочности на растяжение при расколе. Для получения сопоставимых результатов в рамках данного исследования были проведены лабораторные испытания на усталостную долговечность на установке тестирования асфальтобетона MTS [21–24] (рис. 8). Испытания проводились на образцах асфальтобетона, отобранных с участка проведения ускоренных испытаний в соответствии со стандартом КНР-JTG E20-2011[1]. При испытании асфальтобетона на раскол температура составляла 15 °C, скорость нагружения — 50 мм/мин. Каждый вид асфальтобетонной смеси подвергался четырем параллельным испытаниям. При испытании на усталостную долговечность в условиях контролируемого напряжения форма сигнала представляла собой полусинусоиду с частотой 10 Гц. В качестве критерия разрушения принималось полное разрушение образца. Каждое испытание проводилось для трех уровней напряжения и трех образцов асфальтобетонной смеси.

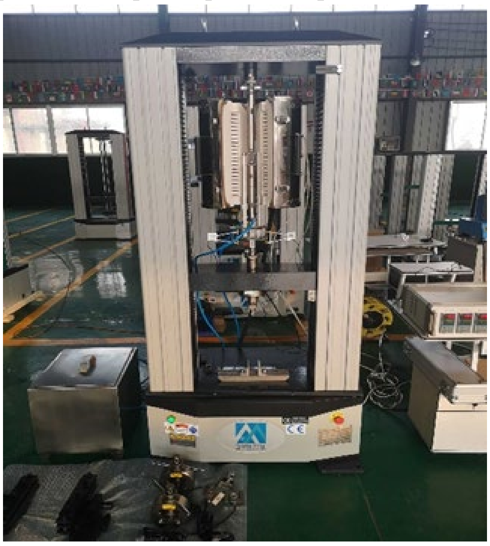


Рис. 8. Установка системы тестирования материалов [21]

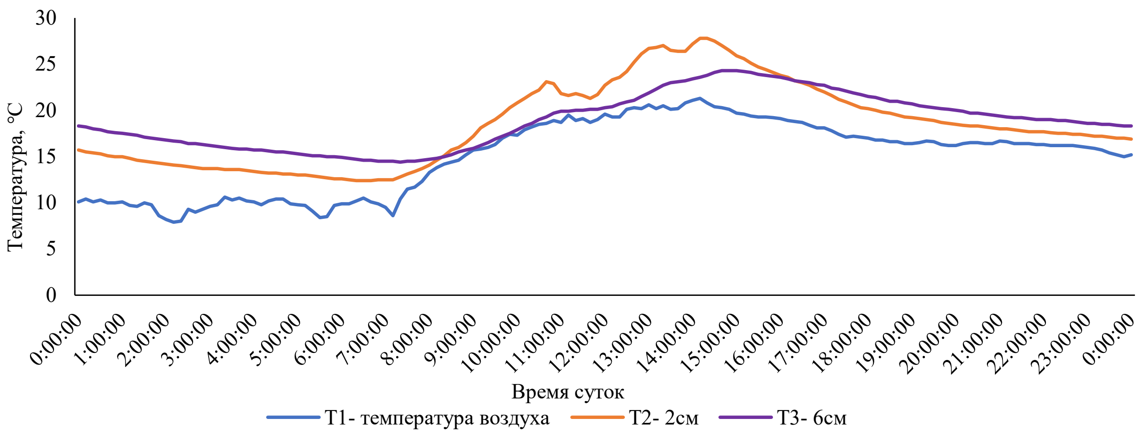


Рис. 9. Диаграмма изменения температуры асфальтобетонных слоев на разной глубине

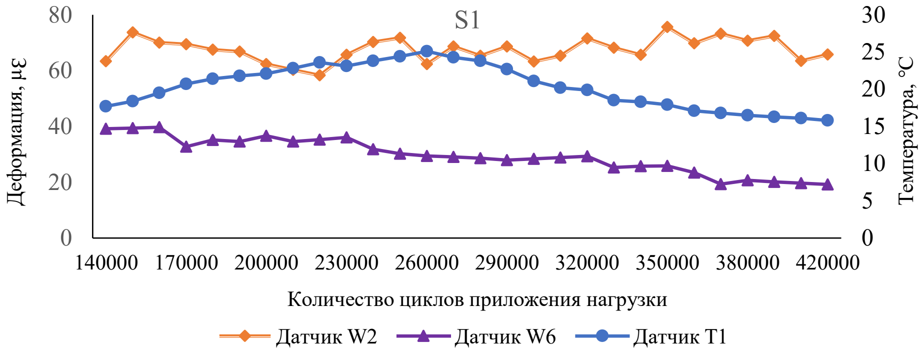
[1] Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E20-2011 «Test Regulations of Asphalt and Asphalt Mixture for Highway Engineering» JTG E20-2011 English PDF (JTGE20-2011). (chinesestandard.net) [S].

Результаты исследования. Температурный режим функционирования дорожной конструкции на участке ускоренных испытаний. Датчики температуры были смонтированы в тестовых конструкциях дорожных одежд на глубине 0,2 и 6 см от поверхности покрытия дороги соответственно (рис. 9).

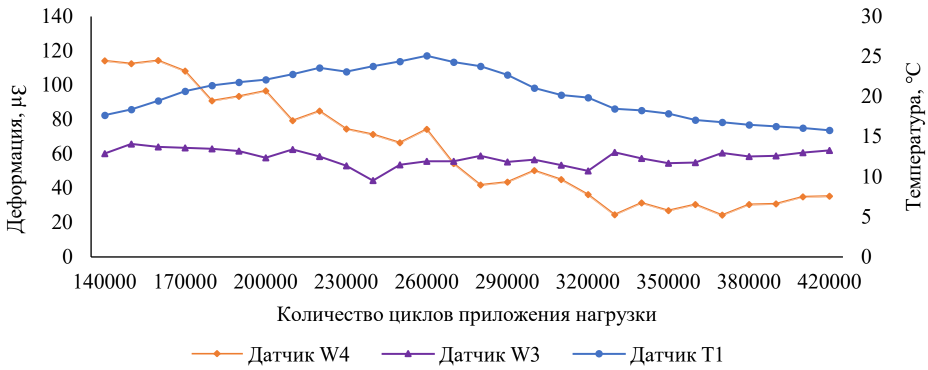
Автоматический сбор данных осуществлялся каждые 15 минут. На рис. 9 показана кривая изменения температуры на различной глубине конструкции дорожного покрытия. Видно, что температура здесь изменяется совместно с изменением температуры окружающей среды. Температура на глубине 2 см от поверхности покрытия практически в течение всего периода наблюдений выше температуры воздуха и температуры на глубине 6 см.

Анализ температуры, напряжений и деформаций в нижнем слое асфальтобетона. При проведении испытаний на установке ускоренного тестирования данные о растягивающих деформациях на нижней границе нижнего асфальтобетонного слоя собирались в течение каждого дня испытаний. Для обеспечения точности и достоверности данных о деформации ее регистрация проходила с использованием канала с частотой передачи 2 000 Гц и непрерывной записью отклика продолжительностью не менее трех минут, с возможностью параллельной фиксации информации о температуре.

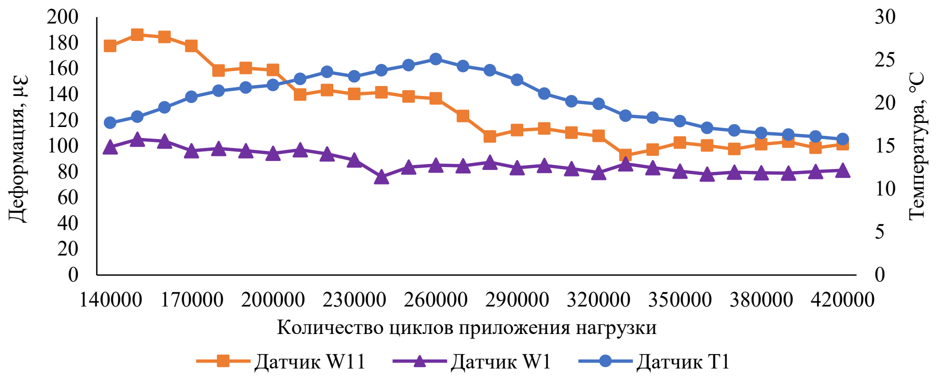
Максимальное число циклов до появления усталостных трещин при испытании на установке ускоренного тестирования составило 420 000 приложений нагрузки. При этом было установлено, что температура оказывает наибольшее влияние на растягивающие деформации в диапазоне от 140 000 до 240 000 приложений, что видно по данным, представленным на рис. 10, 11.



а)



б)



в)

Рис. 10. Кривая изменения деформации в зависимости от температуры на нижней грани нижнего слоя покрытия и верхнего слоя покрытия при различном времени нагружения: *а* — конструкция S1; *б* — конструкция S2; *в* — конструкция S3

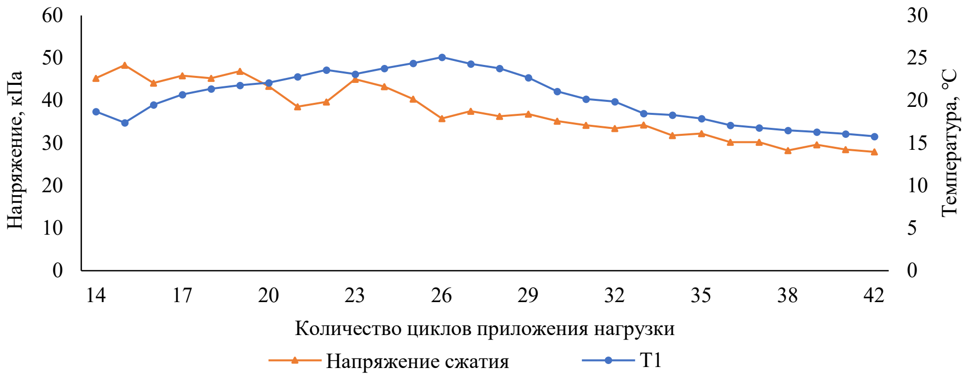


Рис. 11. Кривая изменения максимального значения напряжения в нижнем слое покрытия в зависимости от температуры при различном времени нагружения

Как видно на рис. 10 и рис. 11, деформация различных слоев дорожного покрытия изменяется в зависимости от температуры при разном времени нагружения: в конструкции S1 растягивающая деформация в нижней части верхнего слоя покрытия составляет 19,3–39,7 με, а деформация на нижней границе нижнего слоя асфальтобетона колеблется от 58,3 до 75,6 με. В конструкции S2 диапазон изменения деформации на нижней границе верхнего слоя покрытия составляет 42,5–64,8 με, диапазон деформации нижнего слоя асфальтобетона — 59,2–115,37 με. Деформации растяжения и сжатия на нижней границе нижнего слоя покрытия постепенно уменьшаются с увеличением времени нагружения и сильно зависят от температуры. Изменения на нижней грани нижнего слоя асфальтобетона не очевидны. В конструкции S3 диапазон изменения деформации в нижней части верхнего слоя покрытия составляет 76,2–105,2 με, диапазон деформации на нижней грани нижнего слоя асфальтобетона составляет 92,8–186,2 με. Деформация при растяжении нижнего слоя покрытия преимущественно не зависит от температуры.

Диапазон изменения сжимающего напряжения на верхней границе слоя основания составляет 30,2–48,3 кПа, по мере увеличения количества нагружений изменение сжимающего напряжения имеет высокую корреляцию с тенденцией изменения температуры.

Анализ результатов испытаний установкой ударного нагружения FWD. Установка FWD применялась, в первую очередь, для определения фактических значений модулей упругости слоев дорожной конструкции и их изменения в процессе тестирования установкой ускоренных испытаний ALF[2] в соответствии с методикой backcalculation [25].

Было проведено в общей сложности шесть испытаний установкой FWD. На каждой точке испытания замеры проводились по три раза при одной и той же нагрузке. Затем в качестве характерного перемещения было использовано среднее значение прогиба в центральной точке нагружения за последние два удара. Кривые изменения вертикального перемещения в точке приложения нагрузки в зависимости от числа циклов приложения нагрузки в ходе ускоренных испытаний показаны на рис. 12.

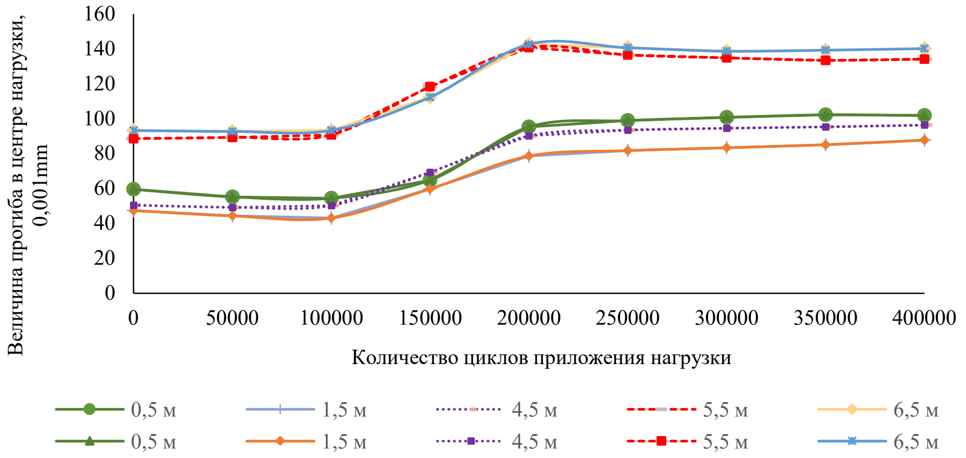


Рис. 12. Кривая отклонения различных конструкций дорожного покрытия в зависимости от времени нагрузки

[2] CAL/APT Contract Team. Test plan for CAL.APT Goal 3 Berkeley [D]. California: Department of transportation, and institute of transportation studies, University of California, 1997. (CALTRANS ACCELERATED PAVEMENT TEST (escholarship.org))

На рис. 12 показано, что величина прогиба в центре приложения нагрузки установкой FWD постепенно увеличивается с увеличением числа нагрузок. В зависимости от температуры и времени загрузки в течение первых 100 000 циклов нагрузки изменение величины прогиба незначительно. Наибольшее изменение величины вертикального перемещения отмечается в диапазоне от 100 000 до 200 000 приложений нагрузки. После 200 000 приложений нагрузки вертикальное перемещение стабилизируется. Поскольку на конструкцию дорожного покрытия воздействуют температура и время нагрузки, прочность конструкции дорожной одежды будет соответственно снижаться, а величина вертикального перемещения — увеличиваться.

Для проверки результатов определения модуля упругости асфальтобетонных слоев с использованием методики backcalculation, базирующейся на результатах испытания установкой динамического нагружения FWD, было проведено дополнительное лабораторное тестирование образцов асфальтобетона с целью определения их динамического модуля упругости[3]. Фактический динамический модуль упругости, как правило, приводится к стандартному значению, замеренному при температуре 20 °С по формуле 1:

$$E_{20} = E_T \cdot e^{-0{,}0722(20-T)}, \tag{1}$$

где E_{20} — обратно рассчитанный модуль асфальтобетонного слоя при 20 °С, МПа; E_T — обратно рассчитанный модуль упругости асфальтобетонного слоя при фактической температуре, МПа; T — температура, °С.

На рис. 13 представлены результаты определения модуля упругости асфальтобетонного слоя основания в зависимости от количества циклов нагрузки, воспроизведенных при ускоренном тестировании.

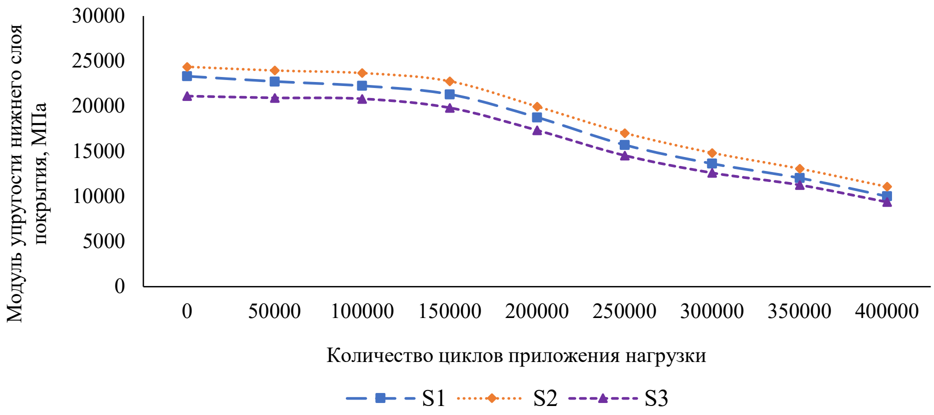


Рис. 13. Изменение динамического модуля упругости нижнего слоя асфальтобетона в зависимости от количества циклов нагружения

На рис. 13 видно, что по мере увеличения количества приложений нагрузки модуль нижнего слоя асфальтобетона различных конструкций дорожного покрытия имеет тенденцию к снижению. На начальном этапе испытания, 0–100 000 приложений нагрузки (нормативная суммарная расчетная нагрузка на ось 0–25,6 млн приложений), модуль упругости нижнего слоя асфальтобетона медленно уменьшается с увеличением количества приложений нагрузки (среднее снижение составляет 5,23 %). Когда количество приложений нагрузки превышает 100 000, скорость снижения модуля упругости нижнего слоя асфальтобетона значительно увеличивается. Модуль упругости нижнего слоя асфальтобетона всех конструкций уменьшается в среднем на 54,87 %.

Анализ испытаний прочности на растяжение при расколе. Как показали результаты испытаний на ускоренное тестирование, усталостные трещины начинают появляться примерно к 350 000 циклу приложения нагрузки. Когда нагрузка достигает 420 000 приложений, наблюдаются усталостные трещины на поверхностном слое асфальтобетона шириной раскрытия до 2 мм и испытание останавливают.

При отборе кернов в местах локализации трещин было установлено, что трещины, как правило, появляются на поверхности покрытия, а не проникают в слои. Большинство из них являются поперечными, проходящими через полосы наката колесной нагрузки, и только малая часть может быть отнесена к нисходящим усталостным трещинам. По результатам лабораторных испытаний образцов асфальтобетона, отобранных на участках ускоренного тестирования, были установлены зависимости прочности на раскол от числа циклов прикладываемой нагрузки.

На рис. 14 показано, что прочность на растяжение при расколе асфальтобетонных смесей в процессе эксплуатации, подвергнутых различному времени ускоренного нагружения, мало изменяется. В целом влияние ускоренного нагружения на прочность на растяжение при расколе асфальтобетонной смеси в процессе эксплуатации незначительно.

[3] AASHTO TP 62-2007 Standard Method of Test for Determining the Percentage of Fracture in Coarse Aggregate [S].(D 5821 – 01 (kashanu.ac.ir))

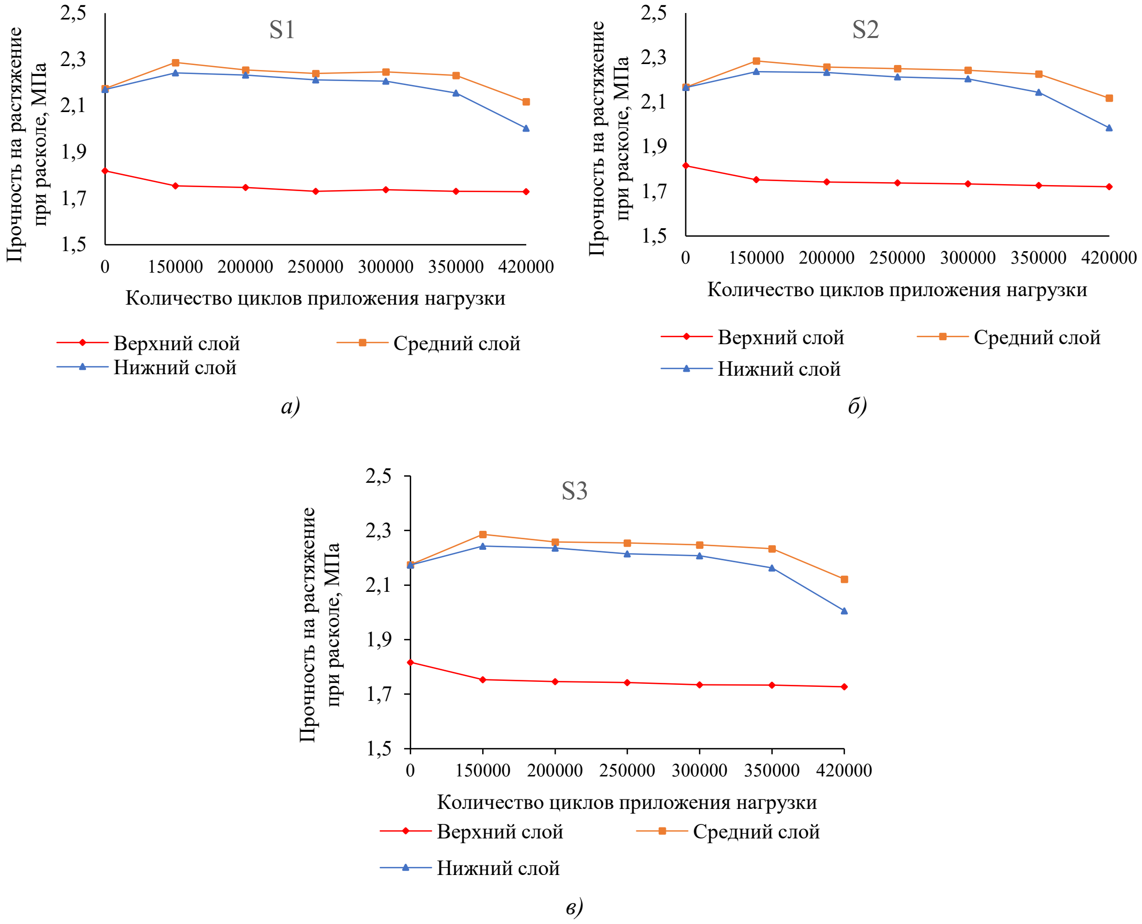


Рис. 14. Предел прочности при непрямом растяжении асфальтобетонных смесей в процессе эксплуатации: *а* — конструкция S1; *б* — конструкция S2; *в* — конструкция S3

Определение расчетного количества циклов асфальтобетона до отказа. В завершении данного исследования в соответствии с нормативным документом КНР JTG D50-2017 «Технические условия на проектирование асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог»[4] и на основе данных, непосредственно полученных авторами данного исследования, с применением метода регрессионного анализа была получена зависимость (2) для прогнозирования предельного количества циклов до наступления усталостного разрушения. Для учета влияния толщины пакета слоев асфальтобетона с применением метода регрессионного анализа и на основе данных, полученных в ходе ускоренных испытаний, была определена зависимость для назначения поправочного коэффициента, представленная на рис. 15.

$$N_f = 0,265\left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{4,51}\left(\frac{1}{E}\right)^{1,42}, \tag{2}$$

$$N_f = C_1 \cdot N_{alf}, \tag{3}$$

где N_f — количество циклов нагружения на фактической конструкции дорожной одежды автомобильной дороги, циклы; N_{alf} — количество циклов нагружения на установке ускоренного тестирования ALF, циклы; ε_t — величина деформации при растяжении на нижней грани асфальтобетонного слоя, мкε; E — модуль упругости асфальтобетонного слоя, МПа; C_1 — поправочный коэффициент между лабораторными значениями и значениями, полученными на полномасштабной испытательной установке ALF.

[4] Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D50-2017 « Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement. Ministry of Transport» [S]. 2017. (JTG D50-2017 English PDF (JTGD50-2017) (chinesestandard.net)).

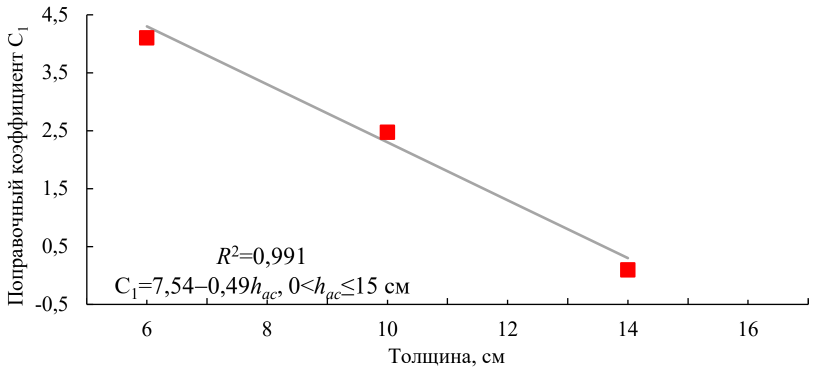


Рис. 15. Взаимосвязь между поправочным коэффициентом ALF и толщиной слоя асфальтобетона

Структура зависимости отвечает общему виду, полученному Asphalt institute [14]:

$$N_f = a\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^b \left(\frac{1}{s}\right)^c, \tag{4}$$

где a, b, c — эмпирические коэффициенты, определяемые исходя из лабораторных или полевых испытаний; ε — предельная деформация, при которой проводятся испытания; s — параметр жесткости материала.

Анализ характеристик механического отклика. В JTG D50-2017 «Технические условия на проектирование асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог» параметр усталостного трещинообразования нижнего слоя асфальтобетона является одним из расчетных показателей, принятых при проектировании. Из-за большей жесткости нижнего слоя асфальтобетона на его нижней границе концентрируются наибольшие растягивающие деформации, что подтверждается результатами, приведенными в данной статье. В рамках численного эксперимента в качестве примера рассматривается конструкция S3 как ключевая контрольная конструкция для расчета деформации при растяжении в нижней части асфальтобетонного покрытия. Расчетная схема дорожной одежды, принятая при моделировании, представлена на рис. 16.

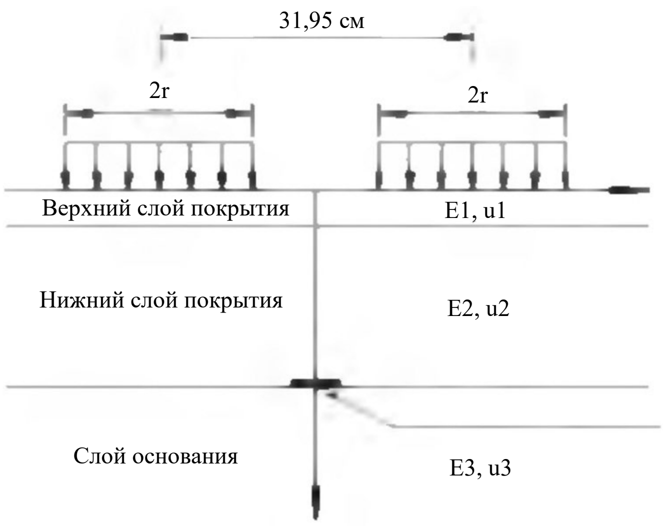


Рис. 16. Модель расчета механического отклика в соответствии с JTG D50-2017

Расчет отклика конструкции выполнен на конечно-элементной модели дорожной конструкции, при этом принята гипотеза о полном сцеплении между всеми конструктивными слоями дорожной одежды. Расчет осуществлен для спаренного колеса автотранспортного средства с нагрузкой на ось 200 кН и давлением 1,1 МПа [25–27]. При подстановке в математическую модель в качестве входных данных использовались модули упругости слоев дорожной одежды, рассчитанные по результатам испытаний установкой ударного нагружения FWD. Результаты сопоставления отклика дорожной конструкции, зарегистрированного при проведении ускоренных испытаний и рассчитанного по методу конечных элементов (МКЭ), приведены на рис. 17.

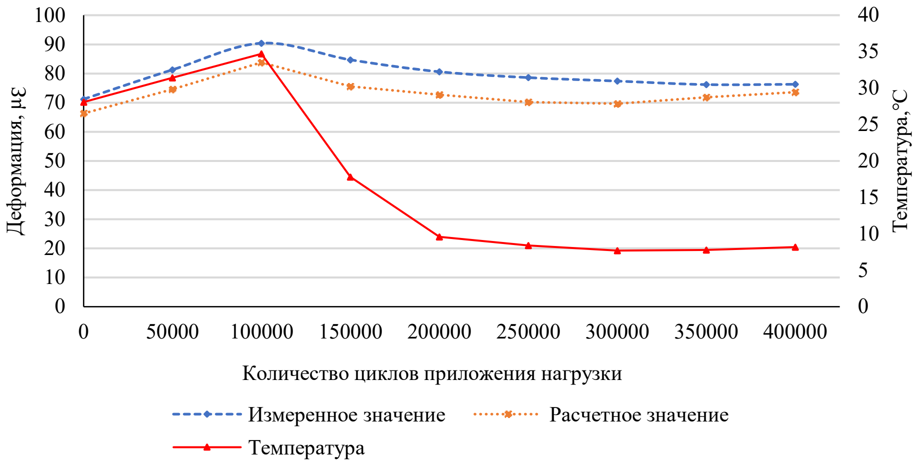


Рис. 17. Сравнение измеренных и рассчитанных значений отклика на деформацию нижнего слоя покрытия S3

Судя по данным на рис. 17, из-за влияния температуры окружающей среды и толщины нижнего слоя асфальтобетона расчетное значение деформации в нижней части немного меньше измеренного значения деформации. Однако это может быть объяснено рядом упрощений, принятых в математической модели. В целом результаты натурных испытаний и численного моделирования достаточно близки и характеризуются схожими тенденциями изменения, что свидетельствует об адекватности как постановки натурных испытаний, так и применяемых методов численного моделирования.

Обсуждение и заключение. Одним из основных результатов, представленных в данной статье и отличающихся от итогов ранее проведенных исследований [3–8, 14, 19, 20], является вывод о превалирующем влиянии толщины верхнего слоя основания на величину вертикальной упругой деформации, регистрируемой на поверхности дорожной конструкции, что подтверждается комплексом экспериментальных измерений с использованием установки динамического нагружения с падающим грузом FWD Primax 1500. В аналогичных работах отмечалось, что в наибольшей степени влияние на величину упругого прогиба на поверхности оказывает совокупное влияние толщины нижнего слоя покрытия и верхнего слоя основания.

Также в рамках данного исследования по итогам комплексного анализа результатов испытаний на установке ускоренного тестирования и численных экспериментов на основе известных моделей прогнозирования усталостных разрушений получены зависимости (2) и (3) для осуществления перехода и обеспечения сопоставимости данных результатов. Следует отметить, что коэффициенты, полученные в ходе данной работы для зависимости (2), отличаются от аналогичных известных нам значений, полученных на полигоне MnRoad [14] (рис. 18).

Коэффициент	Зависимость MnRoad	Зависимость, полученная авторами
a	0,314	0,265
b	3,291	4,510
c	0,854	1,420

Рис. 18. Коэффициенты зависимости MnRoad и полученные авторами

Отличия в коэффициентах в значительной степени обусловлены различиями в правилах подбора асфальтобетонных смесей, а также региональными условиями проведения испытаний. Также следует отметить, что данные коэффициенты несколько ужесточают классическую модель работоспособности, уменьшая прогнозный срок службы дорожных одежд, в сравнении с моделью MnRoad.

Несомненно, данные результаты получены для достаточно ограниченной выборки экспериментов и набора материалов по своим физико-механическим свойствам, соответствующих требованиям к асфальтобетонным смесям, используемым при возведении автомобильных дорог в КНР, и достаточно близким к смесям, применяемым в Российской Федерации. Вместе с тем видится перспективность использования полученных результатов, в дальнейшем работы по калибровке зависимости будут продолжены с учетом данных с тестовых участков эксплуатируемых автомобильных дорог в РФ и КНР.

В ходе лабораторных испытаний на прочность на раскол установлено, что прочность при раскалывании практически не зависит от количества циклов нагружения испытанных асфальтобетонов при проведении ускоренного тестирования.

Полученные результаты могут быть применены для дальнейшей разработки и усовершенствования нормативной базы дорожной отрасли, регламентирующей методы расчета и прогнозирования усталостного трещинообразования.

Список литературы

1. Ji Xiaoping, Zheng Nanxiang, Niu Sisheng, Meng Shutao, Xu Quanliang. Development of a Rutting Prediction Model for Asphalt Pavements with the Use of an Accelerated Loading Facility. *Road Materials and Pavement Design*. 2015;17(1):1–17. https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1055337

2. Insoo Yeo, Youngchan Suh, Sungho Mun. Development of Remaining Fatigue Life Model for Asphalt Black Base through Accelerated Pavement Testing. *Construction and Building Materials*. 2008;22(8):1881–1886. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.015

3. Chen Shao Xing, Wei Xin Ren. Study Fatigue Performance Predict Model of Asphalt Layer Basement on Accelerated Loading Test. *Advanced Materials Research*. 2011;255–260:3238–3243. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3238

4. Zexin Ma, Li-Ping Liu, L.-J. Sun. Damage and Failure Performance of In-Service Asphalt Mixture Based on Accelerated Loading Test. *Journal of Jilin University*. 2019;49(2):384–391. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20171109

5. Shao Xing Chen, Wei Xin Ren. Study Fatigue Performance Predict Model of Asphalt Layer Basement on Accelerated Loading Test. *Advanced Materials Research*. 2011;255:3238–3243. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3238

6. *TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP synthesis 433): Significant Findings from Full Scale Accelerated Pavement Testing*. Washington, DC: The National Academies Press; 2012. https://doi.org/10.17226/22699

7. Timm D.H, Priest A.L, McEwen T.V. *Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track*. Auburn AL: National Center for Asphalt Technology; 2004. 89 p. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38610 (accessed: 20.07.2023).

8. Ji Xiaoping, Zheng Nanxiang, Hou Yueqin, Niu Sisheng. Application of Asphalt Mixture Shear Strength to Evaluate Pavement Rutting with Accelerated Loading Facility (ALF). *Construction and Building Materials*. 2013;41:1–8. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.111

9. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Integrated Approach to Studying Characteristics of Dynamic Deformation on Flexible Pavement Surface Using Nondestructive Testing. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016;(2):111–130. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08

10. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Assessment of Durability Indicators of Flexible Pavements on the Basis of the Mechanical-Statistical Method. *MATEC Web of Conferences*. 2018;196:01020. https://doi.org/10.1051/matecconf/201819601020

11. Углова Е.В, Тиратурян А.Н., Шило О.А. Прогнозирование накопления усталостных разрушений в асфальтобетонных слоях нежестких дорожных одежд. *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2019; 55(3):52–61. https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.006

12. Nithin Sudarsanan, Youngsoo Richard Kim. A Critical Review of the Fatigue Life Prediction of Asphalt Mixtures and Pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022;9(5):808–835. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.003

13. Sohrab Zarei, Jian Ouyang, Yanqing Zhao. Evaluation of Fatigue Life of Semi-Flexible Pavement with Cement Asphalt Emulsion Pastes. *Construction and Building Materials*. 2022;349:128797. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822024540 (accessed: 20.07.2023).

14. Tanquist B. Local Road Material Properties and Calibration for MnPAVE Summary Report. Saint Paul, MN: Minnesota Department of Transportation; 2008. 43 p. URL: https://www.lrrb.org/media/reports/200856.pdf (accessed: 20.07.2023).

15. Jian Zou, Roque R., Byron T. Effect of HMA Ageing and Potential Healing on Top-down Cracking Using HVS. *Road Materials and Pavement Design*. 2012;13(3):1–16. https://doi.org/10.1080/14680629.2012.709177

16. Zhen Liu, Xingyu Gu, Hua Ren, Zhou Zhou, Xiang Wang, Shi Tang. Analysis of the Dynamic Responses of Asphalt Pavement Based on Full-Scale Accelerated Testing and Finite Element Simulation. *Construction and Building Materials*. 2022; 325:126429. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126429

17. Ze Jiao Dong, Sheng Long Li, Jia Yu Wen, Hong Chun Chen. Asphalt Pavement Structural Health Monitoring Utilizing FBG Sensors. *Advanced Engineering Forum*. 2012;5:339–344. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.5.339

18. Wei Lu, Kayser S., Wellner F. Impact of Surface Temperature on Fatigue Damage in Asphalt Pavement. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*. 2013;7(3):1–6. https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000324

19. Lin Wang, Jincheng Wei, Wenjuan Wu, Xiaomeng Zhang, Xizhong Xu, Xiangpeng Yan. Technical Development and Long-Term Performance Observations of Long-Life Asphalt Pavement: A Case Study of Shandong Province. *Journal of Road Engineering*. 2022;2(4):369–389. https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.11.001

20. Jinting Wu, Fen Ye, Yinting Wu. Modulus Evolution of Asphalt Pavement Based on Full-Scale Accelerated Pavement Testing with Mobile Load Simulator. *International Journal of Pavement Engineering.* 2014;16(7):1–11. https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943213

21. Yong Pen, Lijun Sun, Yongjiu Shi. Factors Affecting the Splitting Strength of Asphalt Mixture. *Journal of Jilin University: Engineering Edition.* 2007;37(6):1304–1307. URL: https://www.researchgate.net/publication/290298136_Factors_affecting_splitting_strength_of_asphalt_mixture (accessed: 20.07.2023).

22. Lu Xue-yuan, Sun Li-jun. Factors Affecting Splitting Strength for AC-13 Modified Asphalt Mixture and Marshall Performance Standard Correlation. *Journal of Jilin University: Engineering Edition.* 2010;40(03):676‒682. URL: http://xuebao.jlu.edu.cn/gxb/EN/abstract/abstract10100.shtml (accessed: 20.07.2023).

23. Yong Chun Qin, Sui Yuan Wang, Wei Zeng, Xiao Pei Shi, Jian Xu, Song Chang Huang. The Effect of Asphalt Binder Aging on Fatigue Performance of Evotherm WMA. *Advanced Materials Research.* 2012;535–537:1686–1692. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1686

24. Castro M, Sánchez J.A. Estimation of Asphalt Concrete Fatigue Curves – A Damage Theory Approach. *Construction and Building Materials.* 2008;22(6):1232–1238.

25. Uglova E.V., Tiraturyan A.N. Interlayer Bond Evaluation in the Flexible Pavement Structures Using a Nondestructive Testing Method. *Procedia Engineering.* 2016;150:1791–1796. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.172

26. Nazarian S., Alvarado G. Impact of Temperature Gradient on Modulus of Asphaltic Concrete Layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2006;18(4):492–499. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(492)

27. Shuhua Wu, Huaxin Chen, Jiupeng Zhang, Zhonghua Zhang. Effects of Interlayer Bonding Conditions between Semi-Rigid Base Layer and Asphalt Layer on Mechanical Responses of Asphalt Pavement Structure. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017;10(3):274–281. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.003

References

1. Ji Xiaoping, Zheng Nanxiang, Niu Sisheng, Meng Shutao, Xu Quanliang. Development of a Rutting Prediction Model for Asphalt Pavements with the Use of an Accelerated Loading Facility. *Road Materials and Pavement Design*. 2015;17(1):1–17. https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1055337

2. Insoo Yeo, Youngchan Suh, Sungho Mun. Development of Remaining Fatigue Life Model for Asphalt Black Base through Accelerated Pavement Testing. *Construction and Building Materials.* 2008;22(8):1881–1886. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.015

3. Chen Shao Xing, Wei Xin Ren. Study Fatigue Performance Predict Model of Asphalt Layer Basement on Accelerated Loading Test. *Advanced Materials Research.* 2011;255–260:3238–3243. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3238

4. Zexin Ma, Li-Ping Liu, L-J Sun. Damage and Failure Performance of In-Service Asphalt Mixture Based on Accelerated Loading Test. *Journal of Jilin University.* 2019;49(2):384–391. https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20171109

5. Shao Xing Chen, Wei Xin Ren. Study Fatigue Performance Predict Model of Asphalt Layer Basement on Accelerated Loading Test. *Advanced Materials Research.* 2011;255:3238–3243. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3238

6. *TRB's National Cooperative Highway Research Program (NCHRP synthesis 433): Significant Findings from Full Scale Accelerated Pavement Testing.* Washington, DC: The National Academies Press; 2012. https://doi.org/10.17226/22699

7. Timm DH, Priest AL, McEwen TV. *Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track.* Auburn AL: National Center for Asphalt Technology; 2004. 89 p. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38610 (accessed: 20.07.2023).

8. Ji Xiaoping, Zheng Nanxiang, Hou Yueqin, Niu Sisheng. Application of Asphalt Mixture Shear Strength to Evaluate Pavement Rutting with Accelerated Loading Facility (ALF). *Construction and Building Materials*. 2013;41:1–8. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.111

9. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Lyapin A.A. Integrated Approach to Studying Characteristics of Dynamic Deformation on Flexible Pavement Surface Using Nondestructive Testing. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016;(2):111–130. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08

10. Tiraturyan AN, Uglova EV. Assessment of Durability Indicators of Flexible Pavements on the Basis of the Mechanical-Statistical Method. *MATEC Web of Conferences*. 2018;196:01020. https://doi.org/10.1051/matecconf/201819601020

11. Uglova EV, Tiraturyan AN, Shilo OA. Prediction of Failure Fatigue Accumulation in Asphalt Concrete Layers of Flexible Pavements. *Russian Journal of Building Construction and Architecture.* 2019;55(3):52–61. https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.006

12. Nithin Sudarsanan, Youngsoo Richard Kim. A Critical Review of the Fatigue Life Prediction of Asphalt Mixtures and Pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2022;9(5):808–835. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.003

13. Sohrab Zarei, Jian Ouyang, Yanqing Zhao. Evaluation of Fatigue Life of Semi-Flexible Pavement with Cement Asphalt Emulsion Pastes. *Construction and Building Materials.* 2022;349:128797. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822024540 (accessed: 22.07.2023).

14. Tanquist B. *Local Road Material Properties and Calibration for MnPAVE Summary Report*. Saint Paul, MN: Minnesota Department of Transportation; 2008. 43 p. URL: https://www.lrrb.org/media/reports/200856.pdf (accessed: 20.07.2023)

15. Jian Zou, Roque R, Byron T. Effect of HMA Ageing and Potential Healing on Top-down Cracking Using HVS. *Road Materials and Pavement Design*. 2012;13(3):1–16. https://doi.org/10.1080/14680629.2012.709177

16. Zhen Liu, Xingyu Gu, Hua Ren, Zhou Zhou, Xiang Wang, Shi Tang. Analysis of the Dynamic Responses of Asphalt Pavement Based on Full-Scale Accelerated Testing and Finite Element Simulation. *Construction and Building Materials.* 2022; 325:126429. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126429

17. Ze Jiao Dong, Sheng Long Li, Jia Yu Wen, Hong Chun Chen. Asphalt Pavement Structural Health Monitoring Utilizing FBG Sensors. *Advanced Engineering Forum*. 2012;5:339–344. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.5.339

18. Wei Lu, Kayser S, Wellner F. Impact of Surface Temperature on Fatigue Damage in Asphalt Pavement. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*. 2013;7(3):1–6. https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000324

19. Lin Wang, Jincheng Wei, Wenjuan Wu, Xiaomeng Zhang, Xizhong Xu, Xiangpeng Yan. Technical Development and Long-Term Performance Observations of Long-Life Asphalt Pavement: A Case Study of Shandong Province. *Journal of Road Engineering*. 2022;2(4):369–389. https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.11.001

20. Jinting Wu, Fen Ye, Yinting Wu. Modulus Evolution of Asphalt Pavement Based on Full-Scale Accelerated Pavement Testing with Mobile Load Simulator. *International Journal of Pavement Engineering.* 2014;16(7):1–11. https://doi.org/10.1080/10298436.2014.943213

21. Yong Pen, Lijun Sun, Yongjiu Shi. Factors Affecting the Splitting Strength of Asphalt Mixture. *Journal of Jilin University: Engineering Edition.* 2007;37(6):1304-1307. URL: https://www.researchgate.net/publication/290298136_Factors_affecting_splitting_strength_of_asphalt_mixture (accessed: 20.07.2023).

22. Lu Xue-yuan, Sun Li-jun. Factors Affecting Splitting Strength for AC-13 Modified Asphalt Mixture and Marshall Performance Standard Correlation. *Journal of Jilin University: Engineering Edition.* 2010;40(03):676–682. URL: http://xuebao.jlu.edu.cn/gxb/EN/abstract/abstract10100.shtml (accessed: 20.07.2023).

23. Yong Chun Qin, Sui Yuan Wang, Wei Zeng, Xiao Pei Shi, Jian Xu, Song Chang Huang. The Effect of Asphalt Binder Aging on Fatigue Performance of Evotherm WMA. *Advanced Materials Research.* 2012;535-537:1686–1692. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.1686

24. Castro M, Sánchez JA. Estimation of Asphalt Concrete Fatigue Curves – A Damage Theory Approach. *Construction and Building Materials.* 2008;22(6):1232–1238.

25. Uglova EV, Tiraturyan AN. Interlayer Bond Evaluation in the Flexible Pavement Structures Using a Nondestructive Testing Method. *Procedia Engineering.* 2016;150:1791–1796. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.172

26. Nazarian S, Alvarado G. Impact of Temperature Gradient on Modulus of Asphaltic Concrete Layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2006;18(4):492–499. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(492)

27. Shuhua Wu, Huaxin Chen, Jiupeng Zhang, Zhonghua Zhang. Effects of Interlayer Bonding Conditions between Semi-Rigid Base Layer and Asphalt Layer on Mechanical Responses of Asphalt Pavement Structure. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017;10(3):274–281. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.003

Поступила в редакцию 01.08.2023
Поступила после рецензирования 14.08.2023
Принята к публикации 18.08.2023

Об авторах:

Ни Гуанцунг, инженер кафедры гражданского строительства и архитектуры Шаньдунского транспортного университета (КНР, провинция Шаньдун, г. Цзинань), ScopusID, ResearcherID, ORCID, ngc931123@163.com

Артем Николаевич Тиратурян, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильных дорог Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, tiraturjan@list.ru

Евгения Владимировна Углова, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных дорог Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, uglova.ev@yandex.ru

Андрей Викторович Воробьев, инженер кафедры автомобильных дорог Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ORCID, andreyvorobyev19@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ни Гуанцунг — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов.
А.Н. Тиратурян — научное руководство, анализ результатов исследований, формирование выводов.
Е.В. Углова — научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов.
А.В. Воробьев — подготовка и доработка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 01.08.2023
Revised 14.08.2023
Accepted 18.08.2023

About the Authors:

Ni Guangcong, Engineer of the Department of Civil Engineering and Architecture, Shan Dong JiaoTong University (5001, Haitang Road, Jinan City, Shandong Province, 250023, China), ScopusID, ResearcherID, ORCID, ngc931123@163.com

Artem N. Tiraturyan, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, tiraturjan@list.ru

Evgeniya V. Uglova, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, AuthorID, ORCID, uglova.ev@yandex.ru

Andrey V. Vorobev, Engineer of the Motorways Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ORCID, andreyvorobyev19@mail.ru

Claimed contributorship:

Ni Guangcong: basic concept formulation, research objectives and tasks computational analysis.
AN Tiraturyan: academic advising, analysis of research results, formulation of conclusions.
EV Uglova: academic advising, analysis of research results, correction of the conclusions.
AV Vorobev: preparation and revision of the text, formulation of conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.